

Simulation von multiagentenbasierten Materialflusststeuerungen

Moritz Roidl, Guido Follert

Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen
Universität Dortmund
Emil-Figge-Str. 73
44221 Dortmund
moritz.roidl@uni-dortmund.de
guido.follert@uni-dortmund.de

Abstract: Das Konzept des *Internet der Dinge* überträgt die Verantwortung für Routing und Servicefunktionen in die Ausführungsebene der heutigen Materialflusststeuerung. Ziele dieses neuen Steuerungskonzeptes sind Vereinfachungen beim Aufbau und bei der Konfiguration der Systeme sowie vereinheitlichte und optimierte Aktionen auf der Basis lokaler Entscheidungen. Die elementare Umsetzung des Konzeptes erfolgt mit Hilfe eines Multiagentensystems, das hier in ein industriell eingesetztes Materialflussmodell integriert wird, um eine hohe Akzeptanz der Ergebnisse bei praxisorientierten Anwendern zu erzielen. Simulationsexperimente in dieser Testumgebung weisen sowohl die logistische Leistung des Systems als auch die Funktionsfähigkeiten der Agenten nach. Die Untersuchungsergebnisse spiegeln die Potenziale des Konzeptes *Internet der Dinge* und die Herausforderungen bei der Simulation derartiger Systeme wider.

1 Das Internet der Dinge

Das Ziel des Konzeptes *Internet der Dinge* ist die autonome Funktion logistischer Strukturen, in denen sich logistische Objekte entsprechend der variierenden Anforderungen ihrer Umgebung verhalten. Für die Intralogistik beinhaltet dieses dezentrale Steuerungskonzept mannigfaltige Potenziale, bspw. die Verkürzung von Ramp-Up-Phasen komplexer Fördersysteme oder die flexible Reaktion auf kurzfristige Systemzustandsänderungen. Im Vergleich zu aktuellen Zentralsteuerungssystemen soll der Verkabelungsaufwand für die Steuerung sinken und der Modularitätsgrad der Fördertechnik steigen. Außerdem repräsentiert das Konzept *Internet der Dinge* ein zentrales Element für die Gestaltung einer Selbststeuerungsphilosophie, bei der die einzelne Entscheidung nicht nur dezentral getroffen, sondern auch durch unmittelbare Informationen des bewegten Transportgutes (z.B. durch Routeninformationen oder lokale Intelligenz) ausgelöst wird [FMS04]. Die Prognose zur Verbreitung dezentraler RFID-basierter Steuerungskonzepte in der Intralogistik [tHL04] ist mit den steigenden Anforderungen an die Dynamik der eingesetzten Systeme begründet und zeichnet sich heute bereits vor dem Hintergrund viel versprechender Entwicklungen ab [BtH07].

2 Problemstellung

Die Steuerung von Anlagen mit hoher Dynamik und Komplexität erfolgt im *Internet der Dinge* mithilfe von Agentensystemen. Die Funktion der Agenten hängt stark von der Kommunikation untereinander ab, so dass sich bereits eine große Zahl von Kommunikationsbeziehungen für mittelgroße Systeme ergibt. Außerdem fügt die dezentrale Selbstorganisation der dynamischen Prozesse im *Internet der Dinge* der herkömmlichen Steuerungslogik eine weitere Komplexitätsebene hinzu, da die verteilten Zustände und die darauf basierenden Steuerungsentscheidungen nicht unmittelbar von außen nachvollzogen werden können. Daher ist es noch stärker als ohnehin schon notwendig, die Abläufe in dezentral gesteuerten Materialflusssystemen mithilfe der Simulation zu analysieren, um damit u. a. eine Testumgebung für die Entwicklungsphase von Algorithmen bereitzustellen und die logistischen Leistungskenngrößen des untersuchten Systems zu ermitteln. Der vorliegende Beitrag stellt einen Ansatz vor, mit dem verschiedenartige Agenten in existierende Materialflussmodelle integriert werden können, um diese Anforderungen zu erfüllen.

Im Vergleich mit den Modellen der Informatik zur Multiagentensimulation sind die industriell eingesetzten Materialflussmodelle weniger abstrakt modelliert. Die materialflusstechnischen Funktionen sind in diesen Modellen noch mit einzelnen Förderern in einem dreidimensionalen Editor detailliert abgebildet und parametrisiert. In der graphischen Animation kann das Förderverhalten im Ablauf der Simulation dabei genau visuell nachvollzogen werden. Damit ermöglicht gerade die angepasste Verwendung eines solchen Werkzeuges der Materialflusssimulation für die hier vorgestellte Agentensimulation, dass anwendungsorientierte Unternehmen, denen die Multiagentensimulation zu abstrakt ist, anhand von bekannten Modellen realer zentral gesteuerter Anlagen die Funktions- und Wirkungsweise von Multiagentensystemen bewerten können. Die zurückhaltende Einstellung der Intralogistikbranche gegenüber Innovationen in der Steuerungstechnik ist vor dem Hintergrund hoher Anforderungen bzgl. Leistung und Verfügbarkeit der gelieferten Anlagen bei zugleich hohen Vertragsstrafen nachvollziehbar. Mit der Anpassung existierender Modelle, die somit in der akzeptierten Experimentierumgebung des eingesetzten Simulationswerkzeuges arbeiten, kann ein Teil dieser Vorbehalte entkräftet werden. Damit können die wesentlichen Fragen zur Bewertung dezentraler Steuerungskonzepte mit Multiagenten in den Mittelpunkt rücken. Diese bestehen aus den Wechselwirkungen zwischen den Leistungskenngrößen (Durchsatz, Durchlaufzeit, Termine), dem Kommunikationsaufwand und der Flexibilität in großskaligen Anwendungsfällen. Es wird in kritischen Fällen erwartet, dass die gewonnene Flexibilität, bedingt durch hohen Kommunikationsaufwand, zu einer negativen Beeinflussung der Leistungskenngrößen führt. Die im vorliegenden Beitrag vorgestellte Experimentierumgebung soll zu einer objektiven und realitätsnahen Untersuchung des Anwendungsfalles mithilfe einer industrienahen Simulationsumgebung beitragen.

Bei [BO00], [GL06] und [PD06] finden sich ähnliche Ansätze zur Simulation von Multiagentensteuerungen, die jedoch entweder den Materialfluss explizit nicht abbilden oder diesen nur im Agentenframework abstrakt simulieren und dabei das zeitbasierte Belegungsverhalten der Fördertechnikelemente unberücksichtigt lassen.

Für die eingesetzte Materialflusssimulation resultieren beim beschriebenen Vorgehen neue Anforderungen, da sie bspw. Kommunikationsfunktionen allenfalls für einzelne Relationen bereitstellt und deshalb für die Abbildung der Agentenkommunikation eine angepasste Modellierungsform der Kommunikation erst entwickelt werden muss.

3 Simulation von multiagentenbasierten Materialflussteuerungen

Es gibt bereits weithin akzeptierte Agentendefinitionen verschiedener Autoren, die in [KC01] mit Blick auf die Anwendung in Logistiksystemen beschrieben werden. Bisher hat sich jedoch keine allgemeingültige Definition durchsetzen können. Daher basiert die hier beschriebene Experimentierumgebung auf der sehr allgemein gehaltenen Definition des AIMA-Agenten „Artificial Intelligence: a Modern Approach“ [RSN04]:

„Ein Agent ist alles, was seine Umgebung über Sensoren wahrnehmen kann und in dieser Umgebung durch Aktuatoren handelt. [...] [Dabei] wollen wir anmerken, dass das Konzept eines Agenten als Werkzeug für die Analyse von Systemen vorgesehen ist und nicht als absolute Charakterisierung, die die Welt in Agenten und Nicht-Agenten unterteilt.“

Entsprechend soll die Experimentierumgebung ein Werkzeug zur Analyse von Agentenkonzepten in Materialflusssystemen sein, das keine absolute Charakterisierung von Agenten vorgibt. Die in [RSN04] beschriebene Struktur eines Agenten, bestehend aus Agentenprogramm und Architektur, ermöglicht aber die Spezifikation einer Architektur, auf der Agentenprogramme als autonome¹ Prozesse simuliert werden. Diese kommunizieren mit anderen Prozessen über definierte Protokolle, um die Verfolgung gemeinsamer Ziele zu koordinieren oder Konflikte durch Verhandlungen zu lösen. Die Wahrnehmungsarten und ausführbaren Aktionen werden dabei durch die Benutzerschnittstelle der unterliegenden Simulationsumgebung bestimmt.

Eine Besonderheit in Materialflusssystemen ist es, dass die zielorientierten Entitäten (Ladeeinheiten) üblicherweise weder Sensoren noch Aktuatoren besitzen. Diese sind in der Fördertechnik angeordnet, deren Entitäten aber wiederum keine individuellen Ziele verfolgen. Mit Rücksicht auf die Nähe zu existierenden Steuerungsarchitekturen wird in dieser Arbeit davon ausgegangen, dass es Agenten gibt, die eindeutig die Fördertechnikelemente repräsentieren. Nur ein solcher Agent erhält die direkten Sensorinformationen und nur er kann die Aktuatoren steuern: er bestimmt den Materialfluss. Andere Agenten, wie etwa Stellvertreter für Ladeeinheiten, müssen mit diesem verantwortlichen Agenten kommunizieren, um ihr Ziel zu erreichen. Im Folgenden soll eine Konzeption zur automatisierten Transformation von Simulationsmodellen vorgestellt werden, welche die hier beschriebene Spezifikation innerhalb der Experimentierumgebung anwendet.

¹ Der hier verwendete Autonomiebegriff für Prozesse unterscheidet sich von dem in [RSN04] verwendeten für Agenten. Nicht die Unabhängigkeit von Vorwissen ist gemeint, sondern Unabhängigkeit, Vollständigkeit und Abgeschlossenheit des simulierten Agentenprogramms und seines Speichers sowie dessen Zugriff auf Sensoren und Aktuatoren.

3.1 Konzeption und Generierung eines multiagenten-gesteuerten Simulationsmodells

Die Simulation von großen Materialflussmodellen stellt immer noch hohe Anforderungen an die ausführende Hardware. Eine Experimentierumgebung sollte es daher ermöglichen, auch einzelne Aspekte von Multiagentensteuerungen zu untersuchen. Das hier beschriebene Werkzeug ermöglicht die automatisierte Analyse der existierenden Modelle, so dass eine für das Simulationsziel geeignete Kombination von Agentenprogrammen und Vorwissen generiert werden kann. Grundsätzlich gilt: je weniger Vorwissen ein Agent hat, desto mehr muss er über seine Umgebung lernen. Je mehr ein Agent lernt, desto höher sind seine Anforderungen an die ausführende Hardware. Die vollständige Simulation von mehreren tausend lernfähigen Agenten kann ein zentral ausgeführtes Simulationsprogramm auf heutiger Hardware an seine Grenzen bringen. In solchen Fällen ist es angebracht, Wissen statisch zu generieren, das reale Agenten in Wirklichkeit erlernen müssen.

Mit zunehmender Größe der Materialflusssysteme wird eine manuelle Verarbeitung der Modelle sehr aufwändig. Zur Lösung des Problems werden diese mithilfe eines Werkzeugs in eine Objektstruktur eingelesen, die das Modell in einen Graphen abbildet. Dieser bildet die Grundlage für die geografische Positionierung der Agenten im Fördersystem, die abhängig vom untersuchten Agentenkonzept und seinen Algorithmen ist. Anschließend wird manuell ein entsprechend angepasster Algorithmus entworfen, der eine dem zu untersuchenden Agentenkonzept angepasste Transformation des Graphen durchführt. Aufgrund der Transformation können dann die Positionen der Agenten im Materialflusssystem festgelegt werden. Dabei werden alle im Modell abgebildeten Daten automatisch berücksichtigt. Zusätzlich ist es möglich, die erstellte Objektstruktur um externe oder inferierte Daten anzureichern.

Da die in der Industrie verwendeten Simulationsumgebungen keine Agentenkonzepte unterstützen, wird auch die Kommunikationsinfrastruktur der Agenten generiert. Die Herausforderung besteht darin, zeitgleiche und asynchrone Kommunikation zu simulieren. Die Zeitverzögerung beim Versand der Nachrichten muss dabei ebenso berücksichtigt werden wie die korrekte Nachbildung der Nachrichtenprotokolle.

Im Simulationsprogramm lassen sich Agenten, Vorwissen und Nachrichten in einer objektorientierten Datenstruktur darstellen. Während der Ausführung der Agentenprogramme in der Simulation senden Agenten Nachrichten an andere Agenten, indem sie über Methodenaufrufe die Nachrichten als Parameter übergeben. Die Methodenaufrufe werden nicht sofort ausgeführt, sondern in die zukünftige Ereignisliste des Simulationsprogramms eingeordnet. So lässt sich die Zeitverzögerung während des Versands der Nachrichten abbilden. Nachrichtenverluste können abgebildet werden, indem Methodenaufrufe stochastisch verteilt nicht in die Ereignisliste eingeordnet, sondern verworfen werden.²

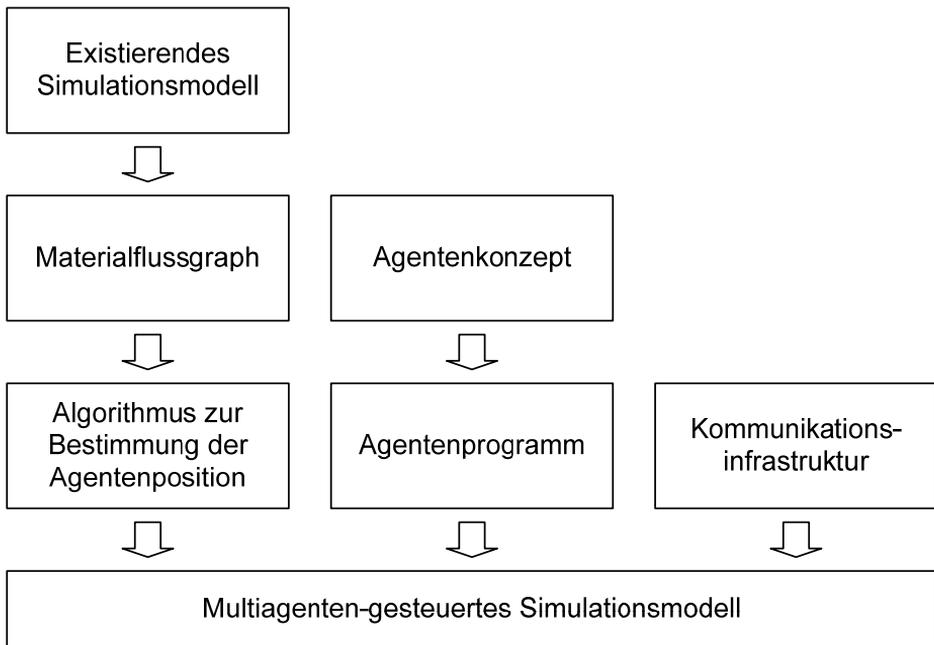


Abbildung 1: Übersicht des Werkzeugs zur automatisierten Generierung von agentengesteuerten Simulationsmodellen

Abbildung 1 zeigt die einzelnen Komponenten des Transformationsprozesses, der ein lauffähiges Simulationsmodell generiert. In dieses Modell sind der Quellcode der Agentenprogramme, das Vorwissen und die Kommunikationsinfrastruktur integriert, welche die Steuerung des Materialflusses durchführen. Das Modell kann anschließend unabhängig vom Werkzeug im Simulationsprogramm zur Ausführung gebracht werden.

² Zu beachten ist, dass die Methodenaufrufe nur Nachrichten von Agent an Agent übergeben. Die Agenten können dann entscheiden, wie sie auf die Nachrichten reagieren. Es gibt also keine Methode, mit der direkt ein Motor angestellt werden kann, sondern nur die Möglichkeit eine Aufforderung zum Motor-Anstellen zu versenden. Diese Aufforderungsnachricht wird dann über einen Methodenaufruf als Parameter übergeben. Der empfangende Agent entscheidet aber letztendlich über seine Reaktion, ob er den Motor anstellt oder nicht.

Über die Abbildung von Agenten auf die Fördertechnik ergibt sich, dass diese ein Netzwerk bilden, das sich an der geografischen Topologie des Materialflusssystems orientiert. Nachbarschaftsbeziehungen von Agenten bedeuten dabei auch Nachbarschaftsbeziehungen im Materialflusssystem und daher Übergänge zwischen Förderelementen. Der so entstehende Graph bildet das unterliegende Materialflusssystem auf Knoten und Kanten ab. Dabei werden die einzelnen Fördertechnikelemente als Knoten und die Übergänge zwischen den Elementen als Kanten dargestellt. Die Differenz zwischen den Positionen der eingehenden Kante und der ausgehenden Kante bestimmt somit die Länge des Weges, den eine Ladeeinheit auf einem Knoten zurücklegt. Zusammen mit der Fördergeschwindigkeit des Knoten ergibt sich die Verweilzeit einer Ladeeinheit auf dem Knoten. Den Kanten wird eine Transferzeit zugeordnet, welche die Dauer des Übergangs von einem Knoten auf den anderen bestimmt. Die Verweildauer einer Ladeeinheit im System ergibt sich durch die Summe ihrer Knotenverweilzeiten und Kantentransferzeiten.

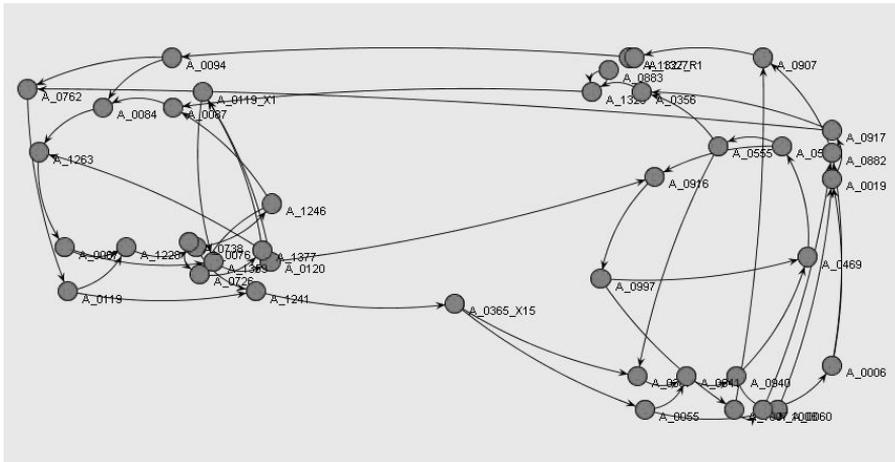


Abbildung 2: Screenshot des Materialflussgraphen eines kleinen Gepäckfördersystems. Angezeigt werden nur Verzweigungen und Zusammenführungen

Agenten werden genau einem Knoten im Materialflussgraphen zugeordnet und übernehmen die Verantwortung für die Sensoren und Aktuatoren des abgebildeten Förderelements. Da je nach gewünschter Verhaltensweise ein Agent auch die Verantwortung für mehrere Förderelemente übernehmen kann oder er nur einen Teilbereich eines Elements übernimmt, ist es unter Umständen notwendig, den Graphen zu transformieren. Abbildung 2 zeigt einen Screenshot des Werkzeugs zur Transformation des Materialflussgraphen. Der abgebildete Graph zeigt die für das Routing wichtigen Entscheidungspunkte, Verzweigungen und Zusammenführungen. Es wird vom Werkzeug gewährleistet, dass der transformierte Graph die Struktur und die Daten des unterliegenden Materialflusssystems abbildet, so dass die Verweildauer einer Ladeeinheit im System weiterhin aus der Summe der Knotenverweilzeiten und der Kantentransferzeiten ihrer Route zu berechnen ist.

4 Anwendungsbeispiel

Als beispielhafter Anwendungsfall für die vorgestellte Untersuchung wurde die Gepäckförderanlage eines Flughafens ausgewählt, bei der das Routing von Gepäckstücken von zentraler Bedeutung ist. Es wird erwartet, dass Multiagentensysteme mithilfe von dezentralen Routingalgorithmen den Entwurf großer Gepäckförderanlagen flexibler machen, die Ausfallsicherheit erhöhen und Wartungsarbeiten erleichtern. Flughafengepäckförderanlagen stellen derzeit eine der größten Herausforderungen für das Routing in Intralogistiksystemen dar.

Die herausragende Leistungskenngröße zur Bewertung der Steuerungen von Flughafengepäckförderanlagen stellt die Verteilung der Durchlaufzeiten transportierter Gepäckstücke dar. Neben der unterliegenden Topologie ist das Routing der Gepäckstücke die maßgebliche Einflussgröße. Wie schon am Anfang dieser Arbeit motiviert, standen bei der beispielhaften Untersuchung nicht die allgemein akzeptierten Vorteile von Multiagentensteuerungen, sondern die herkömmlichen Leistungskenngrößen im Blickpunkt. Da die Routingagenten uniform modelliert wurden, konnte ein einziges Agentenprogramm für alle Agenten verwendet werden. So wurde die Anzahl der Codezeilen bei vergleichbarer Funktionalität auf unter 1000 reduziert. Da die bisherige Programmierung für jeden Entscheidungspunkt separaten Code erfordert, bedeutet dies bei dem hier verwendeten Simulationsmodell eine Reduzierung der Anzahl von Codezeilen um den Faktor 10.

Das verwendete Modell enthält mehr als 18.000 Fördererlemente und mehr als 2.000 unterschiedliche Start-, Ziel- und Entscheidungspunkte. Daraus leiten sich etwas mehr als 2000 Agenten ab, die an genau diesen Punkten generiert wurden. Die Position der Punkte wurde mithilfe des entwickelten Werkzeugs automatisiert ermittelt. Das anschließend generierte Simulationsmodell verarbeitet auch große Systemlasten mit bis zu 10.000 Gepäckstücken pro Stunde ohne Staubildung. Die Auswertung einzelner Szenarien zeigt im Vergleich, insbesondere der Durchlaufzeit, dass die erzielbaren logistischen Kenngrößen mit denen einer zentralen Steuerung vergleichbar sind.

Die Agenten verwendeten eine Adaption des Dynamic Source Routing, die das Netzwerk für jedes Paket mit Routinganfragen flutet [JDM96]. Die Agenten senden dabei Routinganfragen an ihre jeweiligen Nachfolger, deren Position an Entscheidungspunkten eine Berücksichtigung jeder Teilstrecke des Systems erlaubt. Die dabei entstehende Kommunikation stellt die größte Herausforderung an das Simulationsprogramm dar, das im hier untersuchten Szenario über $65 \cdot 10^6$ Nachrichtenübertragungen während 6 Simulationsstunden berechnen muss. Die Anpassungen des Algorithmus betreffen die Berücksichtigung der Transportzeiten des unterliegenden Materialflusssystemes, die Lastverteilung auf mehrere günstigste Routen und das Routen über Zwischenstationen (Security Levels, Manual Encoding).

5 Fazit

Es konnte gezeigt werden, dass mithilfe von automatischer Analyse, Transformation und Codegenerierung auch große, existierende Simulationsmodelle mit einer Multiagentensteuerung versehen werden können. Dies bildet die Basis für breit angelegte, zukünftige Untersuchungen von Multiagentensystemen und dezentralen Algorithmen in Simulationsmodellen von realen Intralogistiksystemen. Dies ist insbesondere vorteilhaft in Anbetracht der Erwartung, dass die dezentralen Ansätze des *Internet der Dinge* eine sehr gute Eignung für komplexe Anwendungsumgebungen besitzen. Weiterführende Arbeiten mit dem vorgestellten Instrumentarium werden sich auf die Untersuchung der mit dem Konzept des *Internet der Dinge* bezogenen Eigenschaften auseinandersetzen.

Literaturverzeichnis

- [BtH07] Bullinger, H.-J. (Hrsg.); ten Hompel, M. (Hrsg.): *Internet der Dinge*. Springer, Berlin, 2007.
- [BO00] Brennan, R. W.; O, W.: A simulation test-bed to evaluate multi-agent control of manufacturing systems. Paper presented at the WSC '00: Proceedings of the 32nd conference on Winter simulation, Orlando, Florida, 2000.
- [FMS04] Freitag, M.; Herzog, O.; Scholz-Reiter, B.: Selbststeuerung logistischer Prozesse - Ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen. In: *Industriemanagement* 20, 2004, Nr. 1; S. 23-27.
- [GL06] Gehrke, J. D.; Lorenz, M.; Wenning, B.-L.; Becker, M.: Integration of two approaches for simulation of autonomous logistic processes. In (Wenzel, Hrsg.): *Tagungsband zur 12. ASIM Fachtagung*; S. 133-143. SCS Publishing House e.V., San Diego, Erlangen, 2006.
- [JDM96] Johnson, D.; Maltz D.: Dynamic source routing in ad hoc wireless networks. In (Imielinski und Korth, Hrsg.): *Mobile Computing*, volume 353. Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [KC01] Krumnacker, C.: *Agentenbasiertes Modell für flexible Informationsschnittstellen in Logistiksystemen*. Verl. Praxiswissen, 2001.
- [RSN04] Russell, S.; Norvig P.: *Künstliche Intelligenz: Ein moderner Ansatz*. Pearson Studium, 2004.
- [tHL04] ten Hompel, M. (Hrsg.); Lange, V. (Hrsg.): *RFID - Logistiktrends für Industrie und Handel*. Praxiswissen, Dortmund, 2004.
- [PD06] Pawlaszczyk, D.: Scalable Multi Agent Based Simulation – Considering Efficient Simulation of Transport Logistics. In (Wenzel, Hrsg.): *Tagungsband zur 12. ASIM Fachtagung*; S. 133-143. SCS Publishing House e.V., San Diego, Erlangen, 2006.